

试验研究

# 六西格玛技术在降低铁水硅含量方面的应用研究

于河<sup>1</sup>,杨鑫<sup>2</sup>

(1 辽宁对外经贸学院,辽宁 大连 116052;2 东北大学 材料与冶金学院,辽宁 沈阳 110819)

**摘要:**通过收集某钢厂2 800 m<sup>3</sup>高炉的生产数据,结合六西格玛管理技术,对铁水硅含量及所选参数进行相关性分析、因果矩阵分析和回归分析,确定了铁水硅含量的主要影响因素有小焦比、冶炼强度、炉渣碱度和铁水温度,它们对硅含量的综合影响贡献率达81.5%。通过增加炼铁过程中小焦比的用量,提高炉渣碱度,并适当降低铁水温度和冶炼强度,铁水中硅含量最大值为0.497%,平均值为0.476%,下降0.05%。

**关键词:**铁水;硅含量;六西格玛;Minitab;回归分析

中图分类号:TF513

文献标识码:A

文章编号:1004-4620(2015)05-0032-03

## 1 前言

当前,国内外钢铁市场处于低迷状态,整个行业经营形势异常严峻,在经济全球化的残酷市场竞争形势下,中国钢铁企业要摆脱困局,就必须走高新技术改造,提高产品质量,扩大品种范围,节能降耗,提高生产率,降低生产成本的道路。中国钢铁工业能耗总量约占全国能耗总量的16%,其中高炉炼铁系统的能耗占整个钢铁企业能耗的比例最大,约为50%<sup>[1-3]</sup>。因此,开展高炉炼铁节能减排的研究对降低生产成本、提高企业竞争力具有非常重要的意义。生铁中硅是高炉冶炼条件和技术水平的标志性指标,也是提高产量、减少燃料消耗、降低生铁成本的重要因素。据统计,铁水中硅含量每降低0.1%,生铁增产0.5%~0.7%,燃料比降低4~6 kg/t,且有利于炉况稳定顺行。对炼钢而言,降低铁水中硅,可大量减少硅反应消耗的氧化钙及其渣量,缩短冶炼时间,提高生产率。因此,降低铁水中硅的冶炼技术不仅是炼铁生产技术进步的重要特征之一,也是现代炼钢工艺的必然要求<sup>[4]</sup>。

据文献记载<sup>[5-8]</sup>,数学模型化的方法已广泛应用于冶金行业,国内外学者利用数学模型研究了高炉工艺过程,并证实了其可行性。近年来,数据挖掘被逐渐引入到炼铁自动控制系统中,并日趋广泛和成熟,发挥了重大作用<sup>[9]</sup>。其中以六西格玛数学管理法<sup>[10-14]</sup>最受钢铁企业欢迎,已经广泛应用于冶金领域中,我国太钢、宝钢、武钢等各大钢企早已成功引进六西格玛,在节能减排、降低成本等方面取得很大成果。对于某钢厂2 800 m<sup>3</sup>高炉铁水中硅含量偏高的问题,结合六西格玛技术,运用Minitab软件

收稿日期:2015-07-13

**作者简介:**于河,女,1974年生,1998年毕业于辽宁大学应用数学专业,硕士。现为辽宁对外经贸学院副教授,从事教学工作 and 应用数学方向研究。

进行分析,采取改进措施,将铁水中硅含量控制在较低水平,满足炼铁生产要求,从而达到了节能降耗、降低成本的目的。

## 2 试验方法和分析模型

某钢厂2 800 m<sup>3</sup>高炉铁水中硅含量( $w[\text{Si}]$ )偏高,为解决此问题,结合六西格玛管理技术,寻找出影响铁水中硅含量的主要影响因素,并通过控制这些影响因素来达到降低铁水中硅含量的目的。

### 2.1 铁水中硅含量的单值控制图

收集某钢厂2011年2 800 m<sup>3</sup>高炉现场生产数据,从每个月随机抽取4组,做铁水中硅含量的单值控制图如图1所示。

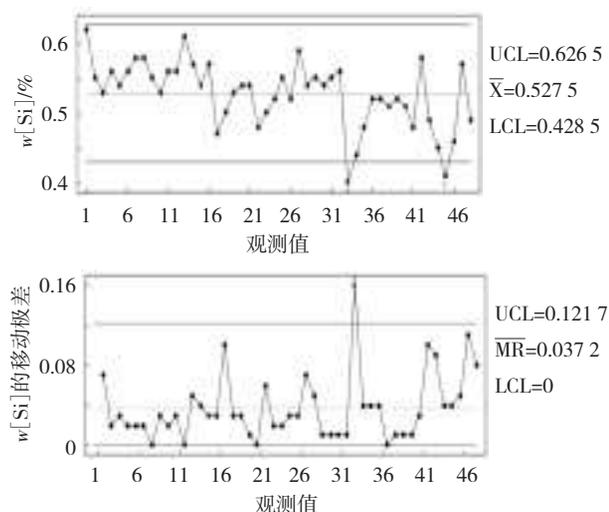


图1  $w[\text{Si}]$ 的单值控制

由图1可见,2011年此2 800 m<sup>3</sup>高炉生产的铁水硅含量最大值达到0.62%,年均值约为0.529%,铁水含硅量偏高。

### 2.2 确定铁水中硅含量的影响因素

#### 2.2.1 初步确定

通过头脑风暴法,利用鱼骨图从原料质量、入炉控制、炉内参数、喷吹控制4方面入手,选取所有

可能影响铁水中硅含量的因素,如图2所示。将上述选取的因素通过相关分析、失效矩阵分析,得到影响铁水中硅含量的主要因素有小焦比、冶炼强度、顶压、压差、铁矿石入炉品位、铁水温度、炉渣碱度、煤气利用系数。

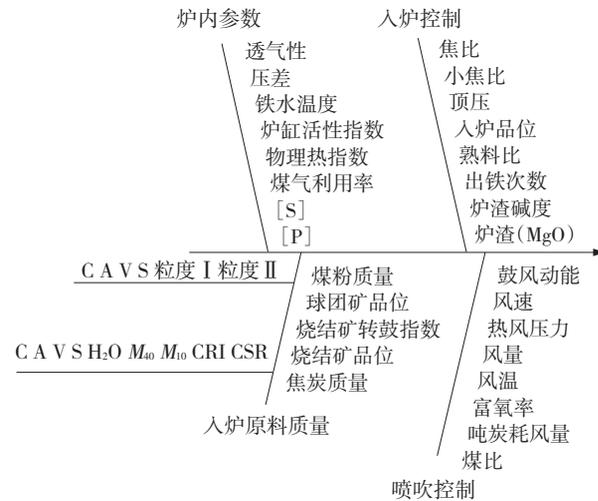


图2 所有可能影响铁水中硅含量的因素的鱼骨图

### 2.2.2 主要影响因素的确定

运用Minitab软件数据分析功能,将上述确立的影响因素与铁水中硅含量进行逐一回归分析,剔除对铁水中硅含量影响不显著的因素,最后得到如下模型:

$$w[\text{Si}] = -8.40 - 3.80 \times 10^{-2}k - 6.690 \times 10^{-1}I + 7.160 \times 10^{-2}T - 8.690 \times 10^{-1}R_2 \quad (1)$$

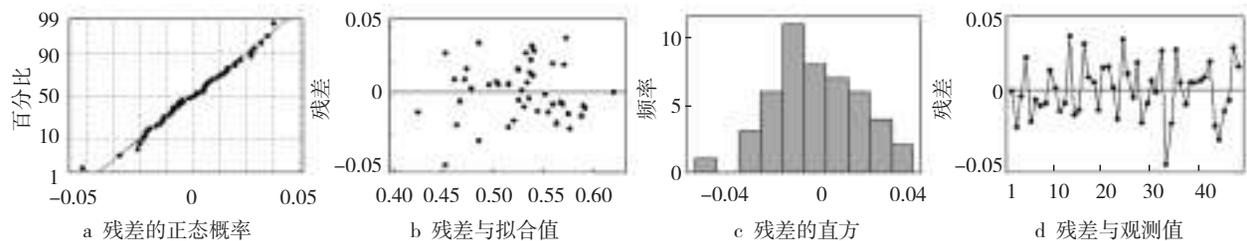


图3 铁水中硅含量的残差

由图3可见,数据趋于正态、随机分布,无倾向性,无异常状态,模型有效。

综上所述,影响铁水中硅含量的主要因素有小焦比、冶炼强度、铁水温度和炉渣碱度,它们对硅的影响贡献率达81.5%。因此,可以通过调控这些影响因素来降低铁水中的硅含量。

## 3 降硅措施

对于2011年该2800 m<sup>3</sup>高炉铁水中硅含量偏高的问题,2012年采取改进措施,将铁水中硅含量控制在较低水平,做小焦比、铁水温度、炉渣碱度和冶炼强度的时间序列模型如图4、图5所示。

由图4可知,2012年小焦比用量较2011年有升高趋势,据文献记载以矿焦混装形式回收利用高炉

式中: $k$ 为小焦比, $I$ 为冶炼强度, $T$ 为铁水温度, $R_2$ 为炉渣碱度。由(1)式可知,铁水中硅含量与小焦比、冶炼强度和炉渣碱度成负相关,与铁水温度成正相关。

回归数据分析和方差分析见表1、表2。

表1 回归分析数据

自变量	系数	系数标准差	T(检验)	P(显著性水平)
常量	-8.4	0.922 2	-9.11	0
小焦比	-0.003 8	0.000 838	-4.54	0
冶炼强度	-0.696	0.132 1	-5.27	0
铁水温度	0.007 16	0.000 618	11.59	0
炉渣碱度	-0.869	0.227 6	-3.82	0

表2 方差分析数据

来源	自由度	SS(离差平方和)	MS(均方和)	F(检验)
回归	4	0.087 498	0.021 875	52.84
残差误差	43	0.017 802	0.000 414	
合计	47	0.105 300		

通过建立模型,由表2方差分析得到 $P=0.000 < 0.005$ ,说明回归效果良好,由表1回归分析可知各影响因素的 $P$ 值( $P=0.000$ ) $< 0.005$ ,说明这些影响因素对铁水中硅含量有显著性影响。且 $S(\sigma$ 的估计量) $=0.020 35$ , $R-Sq$ (多元全相关系数) $=83.1\%$ , $R-Sq$ (调整后的多元全相关系数) $=81.5\%$ ,即小焦比、冶炼强度、铁水温度和炉渣碱度对铁水中硅含量的综合影响贡献率达到81.5%, $R-Sq$ 和 $R-Sq$ (调整)二者差距较小,说明模型精确度较高。

对上述建立的铁水中硅含量回归模型进行残差分析,见图3。

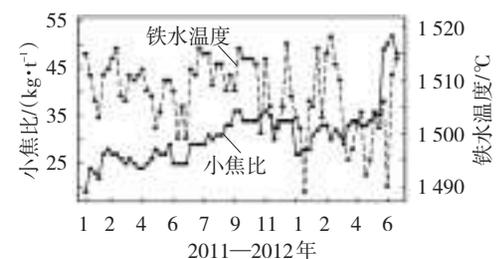


图4 小焦比和铁水温度的时间序列

槽下小块焦,不仅能提高块状带和软熔带矿石层的透气性,促进矿石还原,提高煤气利用率,而且能显著降低焦比和生产成本<sup>[15]</sup>。因此,适当地提高小块焦的用量,有利于高炉稳定顺行,降低铁水中的硅含量。2012年铁水温度值较2011年有所降低,由于铁水温度与铁水硅含量有正相关关系,在保证炉内热制度稳定的情况下,适当降低铁水温度可使铁水

中的硅含量相应地降低。

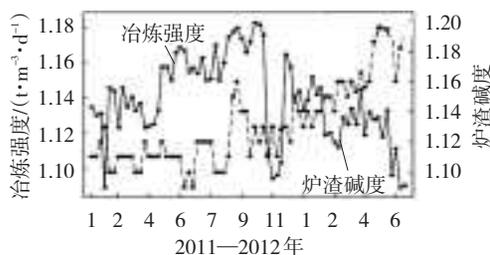


图5 冶炼强度和炉渣碱度的时间序列

由图5可知,2012年炉渣碱度较2011年大幅度提高,冶炼强度呈降低趋势。炉渣碱度升高,降低了二氧化硅的活度,并抑制一氧化硅的挥发量,从而降低了铁水中的硅含量;当代某些大型高炉过分追求较高的冶炼强度,而忽略了燃料比的大幅提高,导致炉况不稳定,反而使高炉各项经济指标变差。因此,2012年炼铁生产中采取控制措施,适当地降低冶炼强度,保证炉况稳定顺行,从而降低铁水中的硅含量。做2011、2012年铁水中硅含量的单值控制如图6所示。

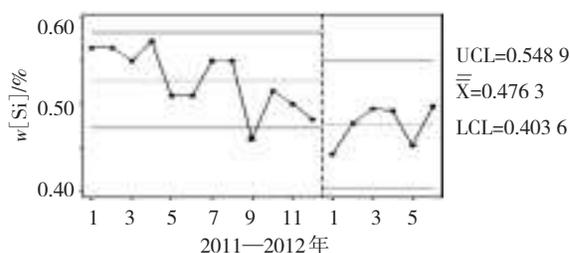


图6 铁水中硅含量的单值控制

如图6可见,2012年1—6月该2800 m<sup>3</sup>高炉铁水中的硅含量最大值为0.497%,均值约为0.476%,较2011年下降0.05%。因此,针对某钢厂2800 m<sup>3</sup>高炉铁水中硅含量偏高的问题,利用六西格玛技术确定影响铁水中硅的主要因素,通过控制这些因素来降低铁水中硅含量具有可行性。

## 4 结论

4.1 通过分析,确定影响铁水中硅含量的主要因素有小焦比、冶炼强度、炉渣碱度和铁水温度,并验证

了各因素对铁水中硅含量的影响显著,它们对铁水中硅含量的综合影响率达81.5%。

4.2 通过增加小焦比用量,提高炉渣碱度,并适当降低铁水温度和冶炼强度,2012年1—6月某钢铁厂2800 m<sup>3</sup>高炉铁水中硅含量最大值为0.497%,硅含量均值为0.476%,较2011年下降0.05%。

### 参考文献:

- [1] 促进企业技术改造,支撑行业持续发展[N].世界金属导报,2012-9-25(37).
- [2] 张琦,姚彤辉,蔡九菊,等.高炉炼铁过程多目标优化模型的研究及应用[J].东北大学学报(自然科学版),2011,32(2):270-271.
- [3] 张寿荣.我国钢铁工业21世纪技术进步的重点[J].钢铁,2005,40(5):1-4.
- [4] 马金芳,贾国利.关于高炉低硅冶炼的探讨[J].中国冶金,2008,18(9):31-33.
- [5] 储满生,郭宪臻,沈峰满,等.基于多流体理论的高炉数学模型及其求解[J].东北大学学报,2007,28(3):361-364.
- [6] 汪致富,杨天钧,倪学梓,等.高炉过程的多目标最优化[J].系统工程理论与实践,1994(11):53-61.
- [7] Rasul M G, Tanty B S, Mohanty B. Modeling and analysis of blast furnace performance for efficient utilization of energy[J].Applied Thermal Engineering,2007,27(1):78-88.
- [8] Ziebig A, Stanek W. Energy and exergy system analysis of Thermal improvements of blast-furnace plants[J].International Journal of Energy Research,2006,30(2):101-114.
- [9] 张建良,曹维超,国宏伟,等.数据挖掘在炼铁系统中的应用现状及展望[J].冶金自动化,2012,36(5):6-9.
- [10] 熊霞.六西格玛管理软件比较[J].计量与测试技术,2008,35(5):27-28.
- [11] 吴民生.六西格玛管理理念与统计过程控制[J].苏州大学学报,2002,22(5):109-111.
- [12] 张根宝.现代质量工程[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [13] 何彦.解读六西格玛管理在企业中的应用[J].中小企业管理与科技,2008(10):17-18.
- [14] 李莉.六西格玛管理的创新性与其局限性[J].山西财经大学学报,2009,12(3):92-93.
- [15] 朱仁良,王天球,王训富.高炉优化操作与低碳生产[J].中国冶金,2013,23(1):33-34.

## Study on Application of 6 $\sigma$ Analysis Method in the Silicon Content in Hot Metal

YU He<sup>1</sup>, YANG Xin<sup>2</sup>

(1 Liaoning University of International Business, Dalian 116052, China;

2 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** In this article, the production data of 2800 m<sup>3</sup> BF in a steel plant were collected. Combined with the Six Sigma Management Method, the method of Causal matrix analysis, Correlation analysis and Regression analysis were used on the silicon content in hot metal and the parameters were selected by Minitab software. It can be determined that the silicon content in hot metal was mainly influenced by small particle coke rate, smelting intensity, slag basicity and hot metal temperature. The comprehensive contribution rate for silicon content in hot metal reached 81.5%. By increasing the amount of small coke rate and slag basicity, decreasing the hot metal temperature and smelting intensity appropriately in the ironmaking process, the maximum of silicon content in the hot metal was controlled up to 0.497%, the average of Si was up to 0.476%, it was decreased by 0.05%.

**Key words:** hot metal; silicon content; six Sigma management method; Minitab; regression analysis